

Пространственно-временной анализ тепловых аномалий как предвестников землетрясений

Б.С. Жуков¹, В. Халле², Г. Шлотцауэр², Д. Эртель²

¹*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32*

E-mail: bzhukov@nserv.iki.rssi.ru;

²*DLR Institut für Robotik und Mechatronik – Optische Informationssysteme,
12489 Berlin, Rutherfordstrasse 2,
E-mail: winfried.halle@dlr.de*

Для оценки возможности использования тепловых аномалий как предвестников землетрясений был проанализирован 8-летний (с 1997 по 2004 гг.) временной ряд ежедневных измерений температуры поверхности Ионического моря и Греции, выполненных с помощью тепловых ИК каналов сканера AVHRR на ИСЗ NOAA. Аномалии выделялись пороговым методом по «отношению сигнал/шум» (ОСШ), где в качестве шума рассматривались фоновые температурные вариации. На основании анализа случая землетрясения 14 августа 2003 г. в Греции сделан вывод о том, что тепловые аномалии поверхности моря с ОСШ>3, одновременно наблюдаемые в различных районах вдоль границы Евразийской и Африканской тектонических плит, могут быть связаны с предстоящим землетрясением. Надежность использования для этих целей тепловых аномалий поверхности суши в данном случае не подтверждена.

Ключевые слова: предвестники землетрясений, тепловые аномалии, спутниковые тепловые ИК наблюдения, землетрясение в Греции 14 августа 2003 г.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме прогноза землетрясений с использованием спутниковых методов [1]. Достигнутый в этой области прогресс позволил создать экспериментальные системы прогноза землетрясений [2-3].

В качестве одного из возможных предвестников землетрясений рассматриваются тепловые аномалии поверхности суши или акваторий [4-9]. Типичные характеристики тепловых аномалий, связанных с землетрясениями:

- величина – 2-4 К (иногда до 6 К),
- появление за 6-24 дней перед землетрясением,
- длительность от 2 дней до 1 месяца,
- площадь – до нескольких десятков тысяч кв. километров.

Целью данной работы являлось проверить на характерных примерах обоснованность использования детектируемых со спутников тепловых аномалий как предвестников землетрясений и оценить адекватность существующих спутниковых съемочных систем для решения этой задачи.

1. Используемые данные и методы

Для анализа было выбрано землетрясение магнитудой 6.4 балла с эпицентром в Ионическом море в 40 км от острова Левкада (20.74° с.ш., 39.18° в.д.), которое произошло 14 августа 2003 г. (рис.1). Это землетрясение ранее детально исследовалось в работе [10]

на основе вейвлет-анализа временных рядов скрытого потока тепла от поверхности, оценка которого требует использования наземных метеорологических измерений. Аномалии скрытого потока тепла наблюдались вдоль границы Евразийской и Африканской тектонических плит 1-2 августа 2003 г, т.е. за 2 недели до землетрясения.

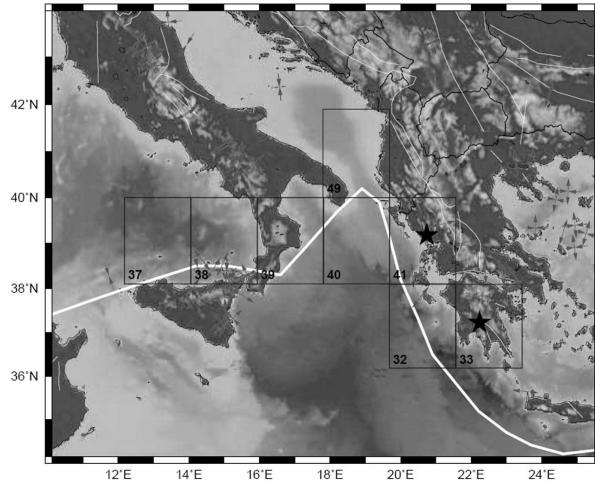


Рис. 1. Карта района исследований. Звездочками отмечены эпицентры землетрясений, которые произошли 14 августа 2003 г. и 1 марта 2004 г. Белой линией показана граница раздела Евразийской и Африканской тектонических плит [10]

В данной работе изучалась возможность предсказания землетрясений по спутниковым наблюдениям тепловых аномалий без использования наземных измерений. Был проанализирован 8-летний (с 1997 по 2004 гг.) временной ряд ежедневныхочных спутниковых измерений температуры Ионического моря и поверхности Греции по данным тепловых ИК каналов сканера AVHRR на ИСЗ NOAA, предоставленных DLR-DFD [11]. Атмосферная коррекция указанных данных проведена с использованием 2-канальных алгоритмов [12] и [13] для температуры поверхности моря и суши соответственно.

Для выделения связанных с землетрясениями тепловых аномалий на фоне сезонных и метеорологических колебаний температуры обычно используются различные методы адаптации температурных порогов [4-9]. В данной работе аномалии выделялись по «отношению сигнал/шум», где в качестве шума рассматривались фоновые температурные вариации:

$$\eta = \frac{|\Delta T - \langle \Delta T \rangle|}{\sigma_{\Delta T}}$$

Здесь ΔT – разность температуры пикселя и средней региональной температуры, $\langle \Delta T \rangle$ и $\sigma_{\Delta T}$ – ее среднее значение и среднеквадратическое отклонение в данной точке в данный месяц за весь период наблюдений. Аналогичный индекс ранее использовался в работе [9].

К сожалению, прямое сопоставление результатов данной работы с работой [10] оказалось невозможным, поскольку в течение 1-2 августа 2003 г, когда по данным [10] в районе отмечены аномалии скрытого потока тепла, он был закрыт облачностью. По этой же причине не удалось проанализировать тепловые аномалии в данном районе в период, предшествовавший второму исследованному в работе [10] землетрясению, произошедшему 1 марта 2004 г.

2. Анализ тепловых аномалий поверхности моря

На протяжении 8 лет наблюдений значительные тепловые аномалии в Ионическом море, а также в других районах Средиземного моря отмечались достаточно часто. Среди них выбирались аномалии, которые наблюдались вблизи показанной на рис. 1 границы раздела тектонических плит, поскольку они с большей вероятностью могли быть связаны с землетрясениями. Так, цепочки относительно сильных положительных аномалий вдоль границы раздела плит наблюдались 6 и 13 августа 2003 г., т.е. за неделю и за день до землетрясения (рис. 2).

Физическим механизмом, объясняющим появление наблюдаемых тепловых аномалий поверхности моря, может быть выделение горячих газов из области активированной границы плит при подготовке землетрясений [14].

Два района с указанными на рис. 2 сильными аномалиями (со средними значениями η , равными 3.5 и 3.15) были выбраны для анализа статистической достоверности их связи с землетрясением 14 августа 2003 г. С этой целью для этих районов были проанализированы вариации температуры поверхности моря и индекса η за 8 лет наблюдений (рис. 3-4). Хотя отклонение температуры в указанных аномалиях не превышает нескольких градусов и маскируется сезонными и межсезонными колебаниями температуры, использование индекса η позволяет выделить их на фоне указанных факторов. В результате получено, что в каждом районе индекс η за 8 лет более 10 раз превышал значение 3, т.е. наблюдение тепловых аномалий в отдельном районе вряд ли может служить надежным предвестником землетрясений.

При анализе корреляции наблюдения аномалий в обоих районах было установлено, что в 6-ти случаях аномалии с $\eta > 2$ наблюдались одновременно в обоих районах (рис. 5в) и только в одном случае - 6 августа 2003, т.е. за неделю до землетрясения в обоих районах одновременно наблюдались тепловые аномалии с $\eta > 3$ (рис. 5г). Этот результат подтверждает вывод работы [10] о том, что одновременное наблюдение достаточно сильных тепловых аномалий вдоль границы тектонических плит существенно повышает надежность прогноза землетрясений.

3. Анализ тепловых аномалий поверхности суши

Анализочных измерений температуры поверхности Греции выявил значительное увеличение числа тепловых аномалий на ее западном побережье вдоль границы тектонических плит 13 августа 2003 – за день до землетрясения. 14 августа 2003 в день землетрясения они распространились на всю территорию Греции и исчезли на следующий день (рис. 6).

В отличие от тепловых аномалий поверхности моря, на суше они носят диффузный характер и распределены по большей площади. Такое распределение тепловых аномалий, а также их очевидный восточный перенос в период с 13 по 14 августа 2003 г. может быть объяснен, например, атмосферным переносом радона и парниковых газов от активированной границы тектонических плит. При указанном характере тепловых аномалий более естественным является использование в качестве их характеристики суммарную площадь аномалий в регионе.

Поскольку тепловые аномалии поверхности суши были более слабыми, чем на море, для их выделения использовался меньший порог: $\eta > 2$. Общая площадь тепловых аномалий имеет сильный пик 13-14 августа 2003 г. Однако, рис.7 показывает, что подобные аномалии в данном регионе не являются необычным явлением. Даже если рассматриваются только аномалии, наблюдавшиеся в августе месяце за все годы наблюдений, их суммарная площадь часто превышает суммарную площадь аномалий, наблюдаемых 13-14 августа 2003 (рис.8). Это обстоятельство свидетельствует о том, что в данном регионе тепловые аномалии поверхности суши могут использоваться для прогноза землетрясений только в комбинации с другими признаками.

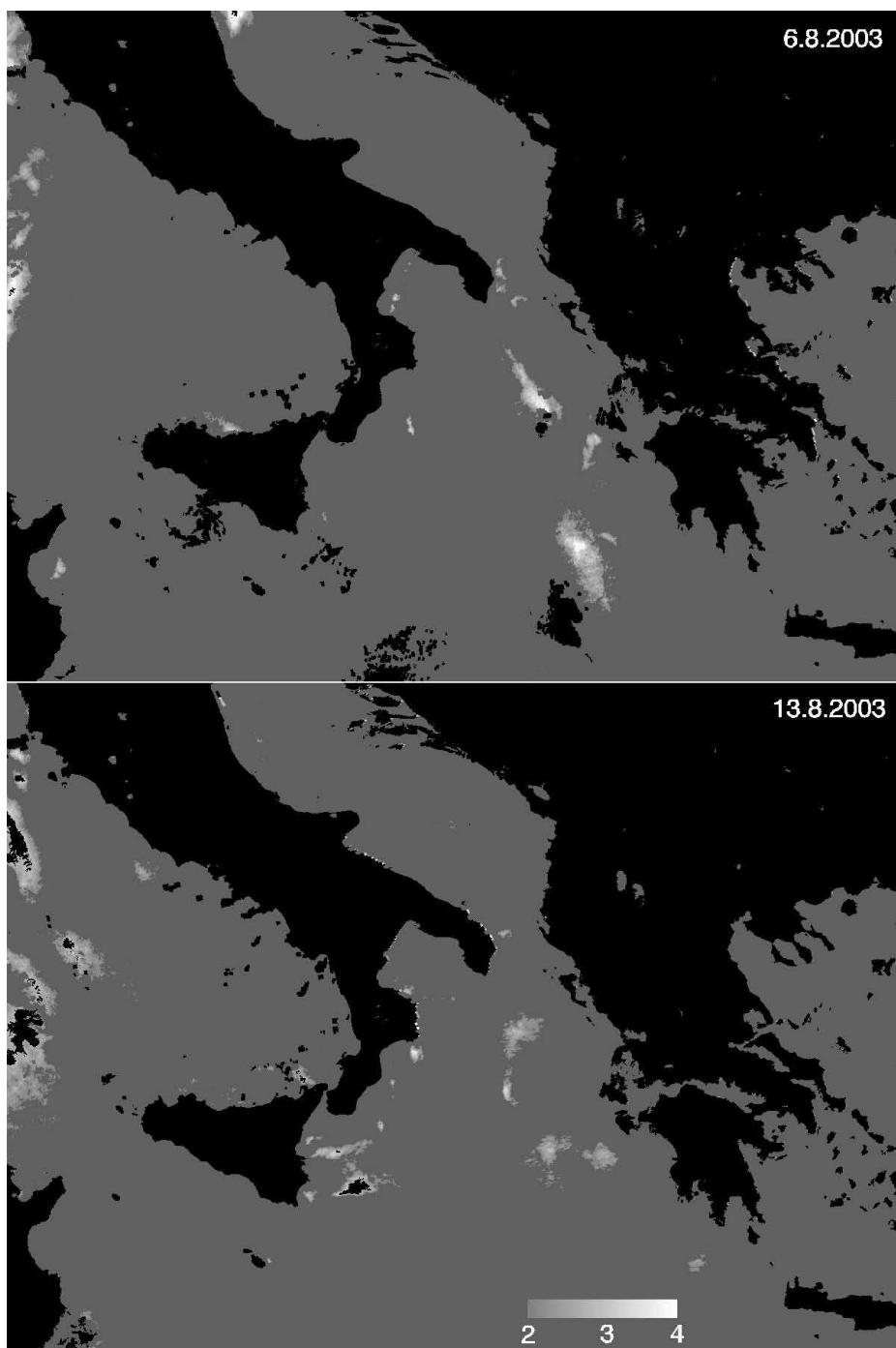
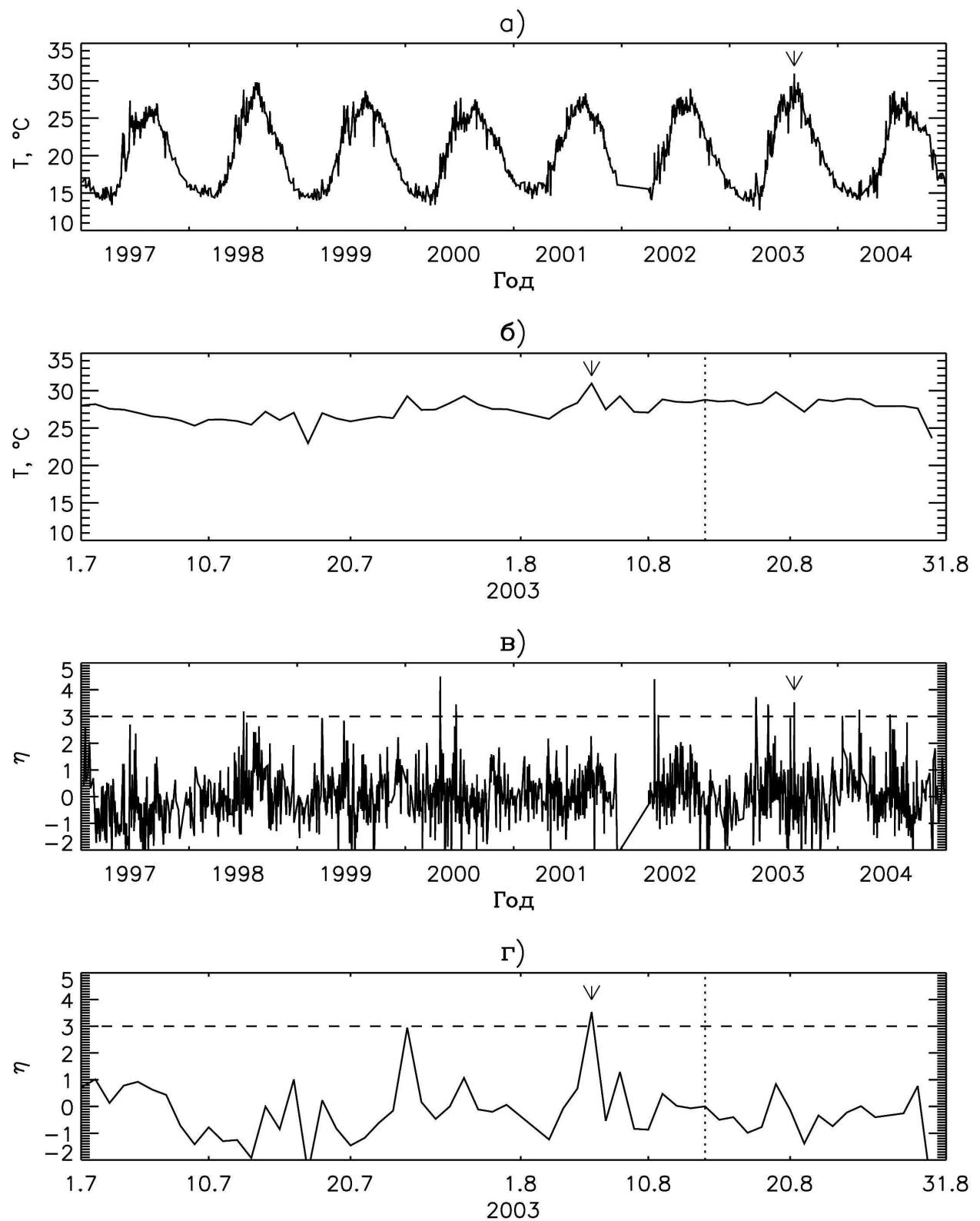


Рис. 2. Распределение индекса η в Ионическом море 6 и 13 августа 2003 г. Шкала яркости соответствует значениям индекса η . Цифрами на верхнем рисунке обозначены выбранные для анализа аномалии



*Рис. 3. Изменение температуры поверхности моря в районе 1 за весь период наблюдений (а) и в июле-августе 2003 г. (б) и соответствующее изменение индекса η (в, г).
Пунктирная линия соответствует дате землетрясения (14 августа 2003 г.).
Стрелка указывает рассматриваемый максимум индекса η (6 августа 2003 г.)*

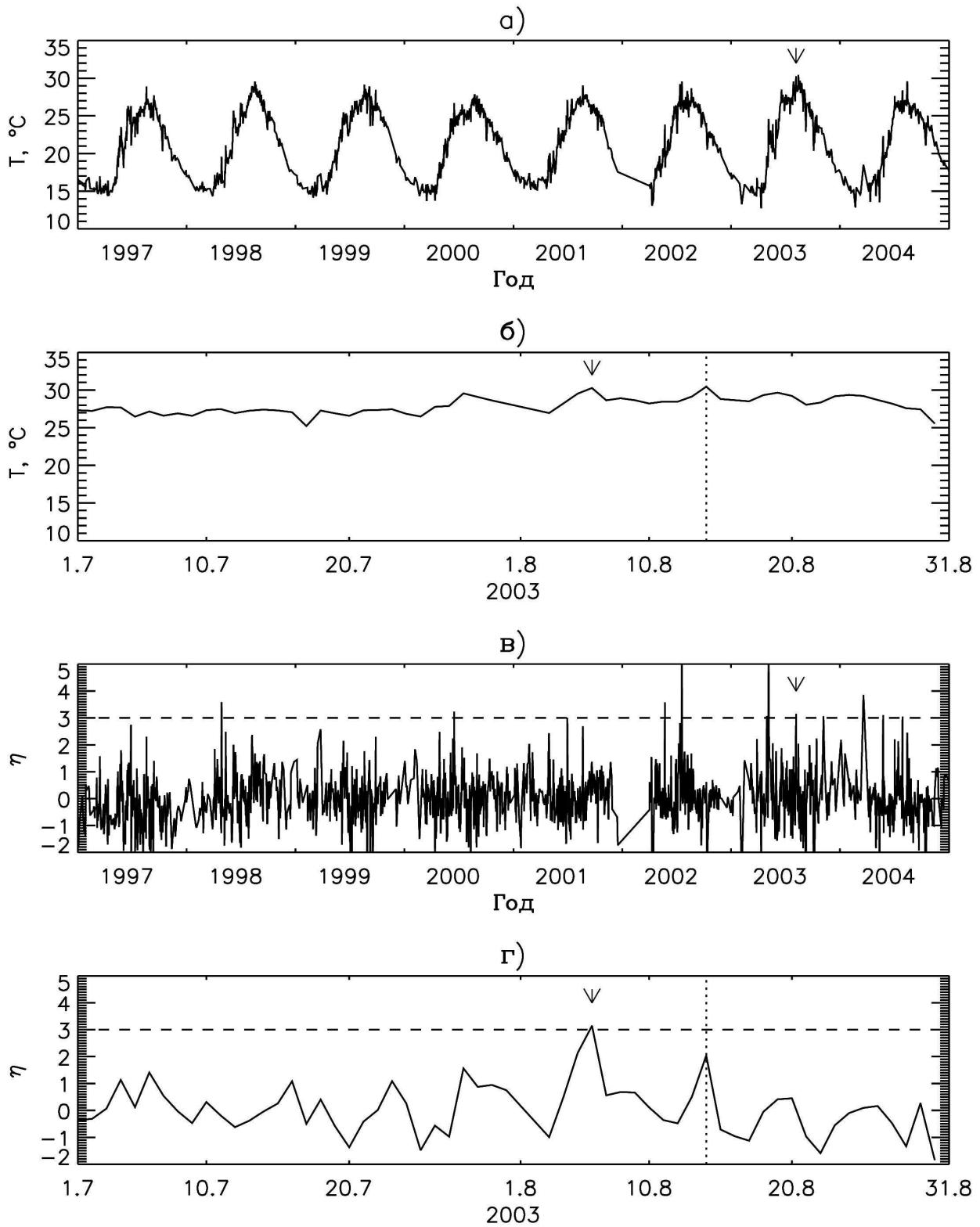


Рис. 4. Изменение температуры поверхности моря в районе 2 за весь период наблюдений (а) и в июле-августе 2003 г. (б) и соответствующее изменение индекса η (в, г).
Пунктирная линия соответствует дате землетрясения (14 августа 2003 г.).
Стрелка указывает рассматриваемый максимум индекса η (6 августа 2003 г.)

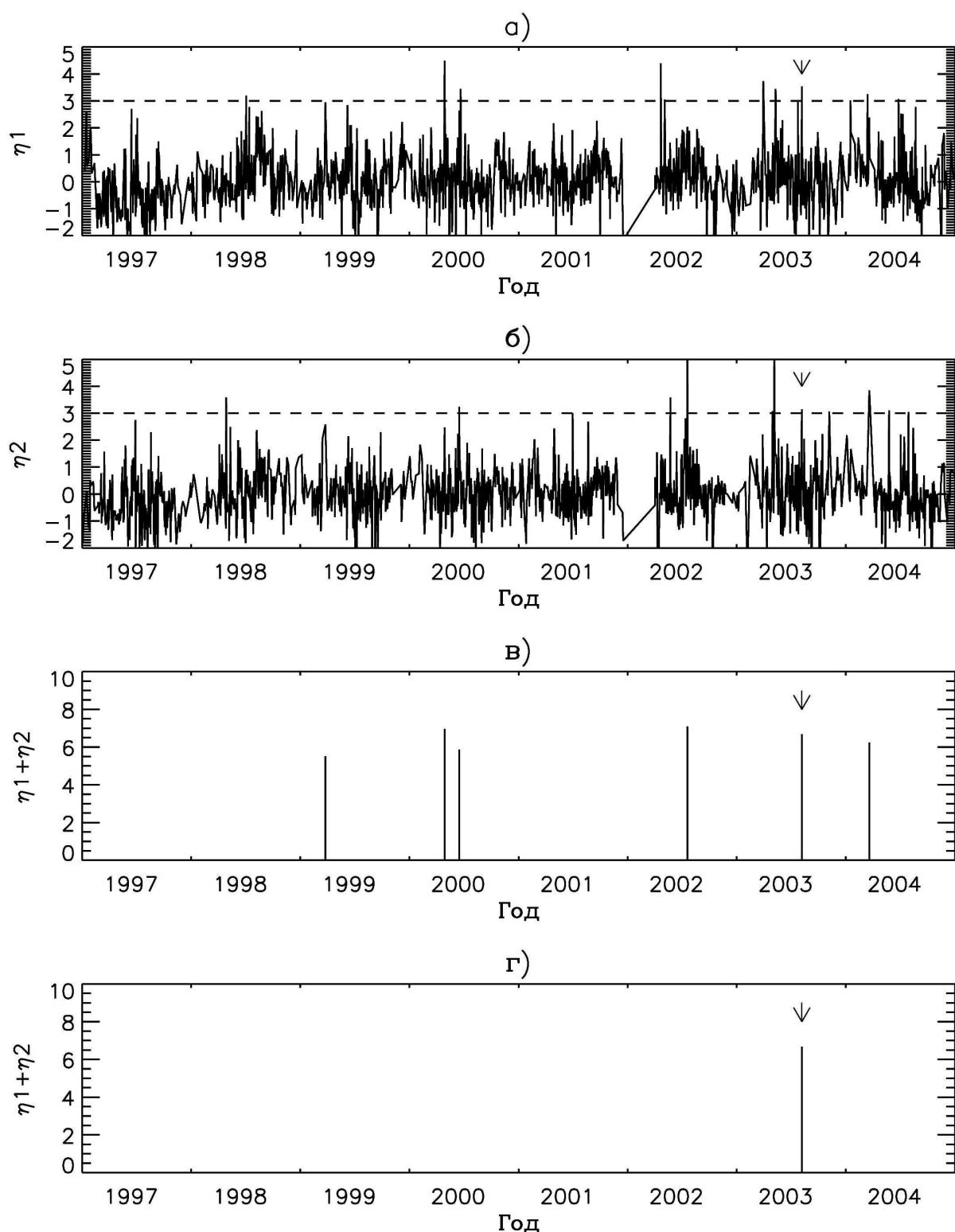


Рис. 5. Изменение индекса η в районах 1 (а) и 2 (б) и сумма индексов η в указанных районах в случае, когда значение каждого из них превышало 2 (в) и 3 (г).

Стрелка указывает рассматриваемый максимум суммарного индекса η (6 августа 2003 г.)

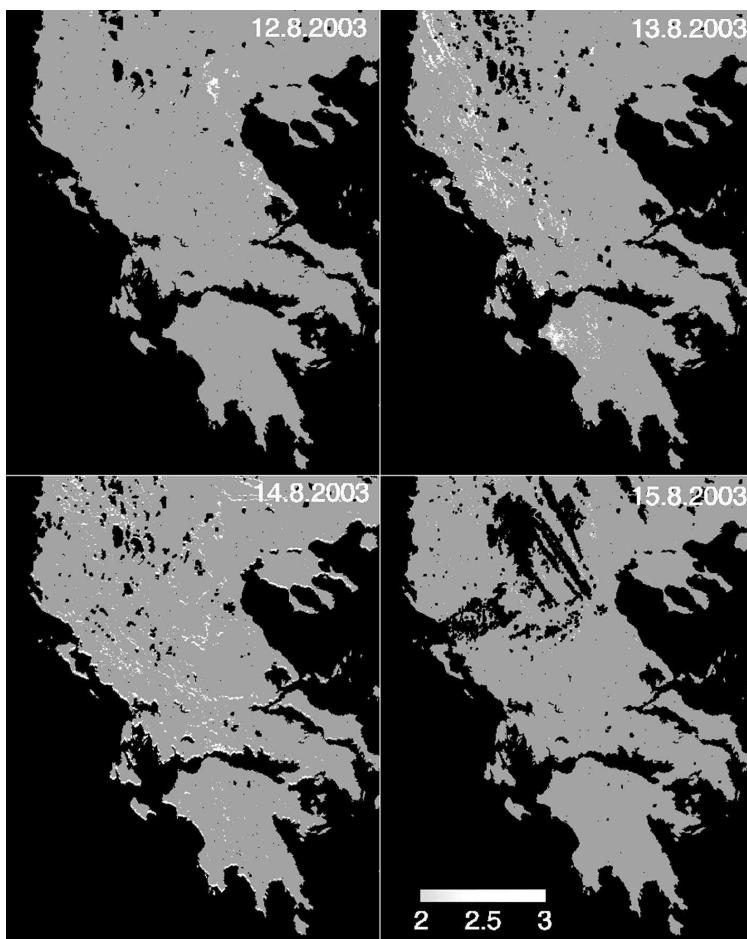


Рис. 6. Распределение индекса η на территории Греции с 12 по 15 августа 2003 г.
Шкала яркости соответствует значениям индекса η

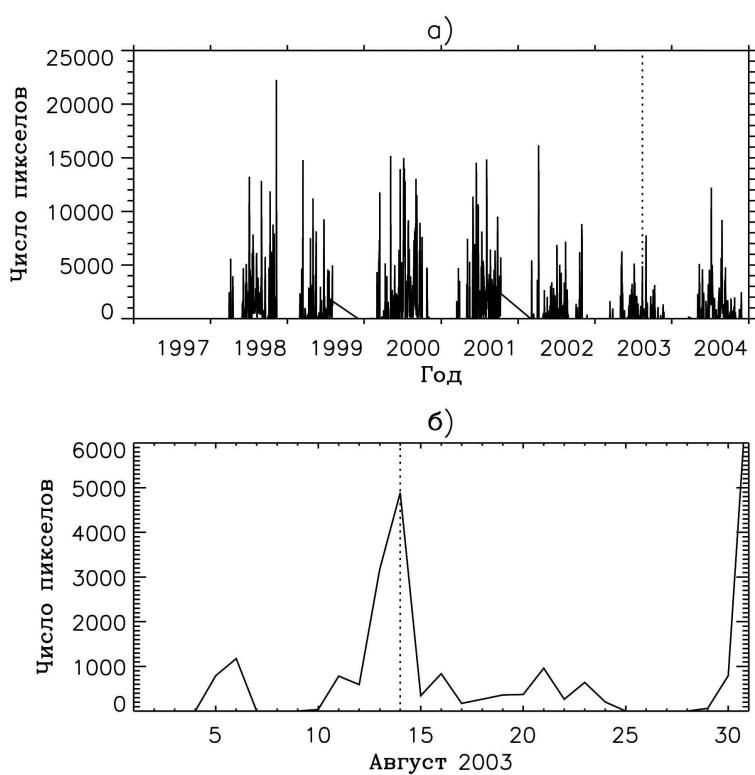
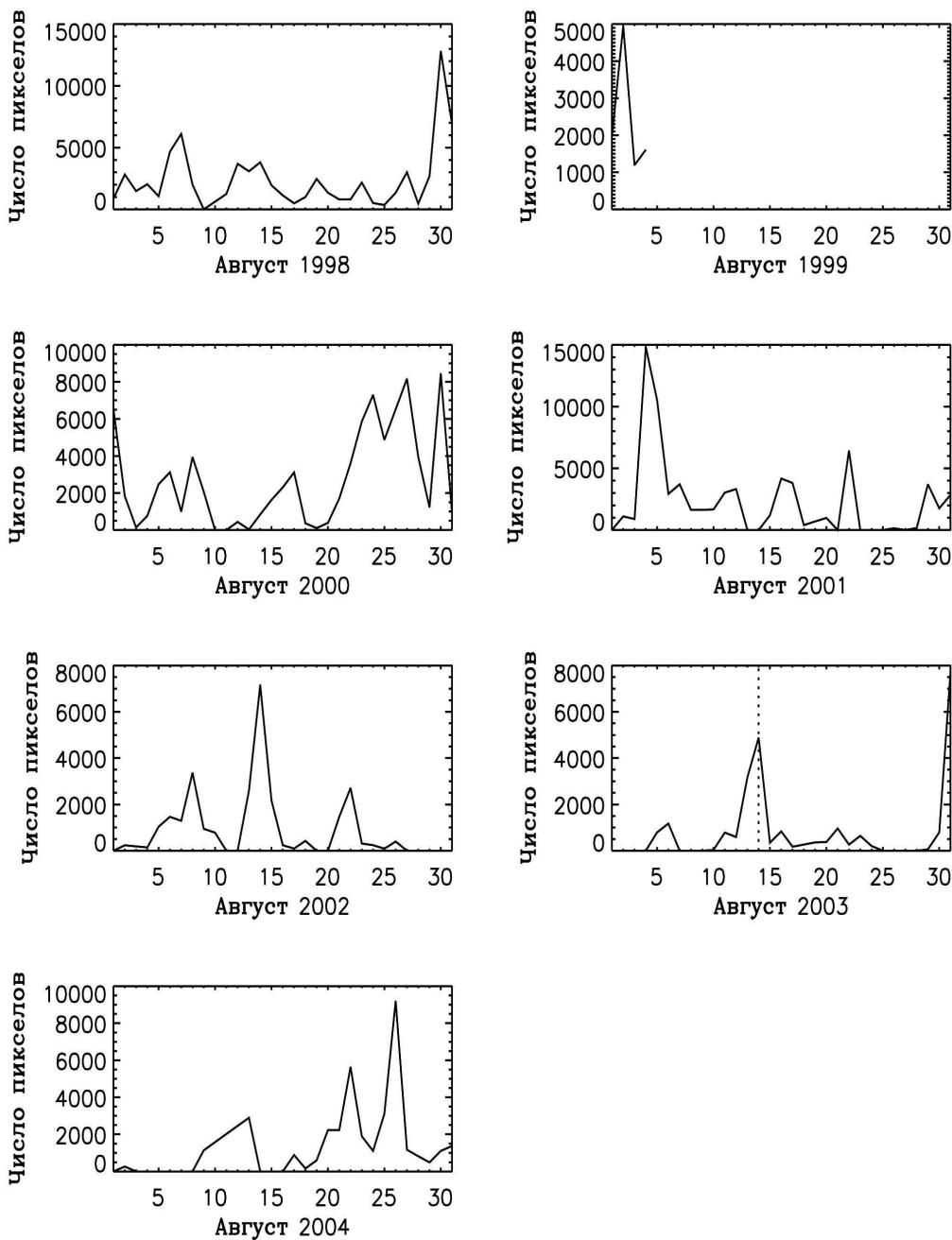


Рис. 7. Полная площадь тепловых аномалий с $\eta > 2$ на территории Греции за весь период наблюдений (а) и в августе 2003 г. Пунктирная линия соответствует дате землетрясения (14 августа 2003 г.)



*Рис.8. Полная площадь тепловых аномалий в Греции с $\eta > 2$ в августе месяце за все годы наблюдений.
Пунктирная линия соответствует дате землетрясения (14 августа 2003 г.)*

Заключение

На основании анализа землетрясения 14 августа 2003 г. в Греции можно сделать вывод о том, что тепловые аномалии поверхности моря, одновременно наблюдаемые в различных районах вблизи границы тектонических плит, по-видимому, могут служить предвестниками землетрясений. Надежность использования для этих целей тепловых аномалий поверхности суши в данном случае не подтверждена.

Для детектирования тепловых аномалий как предвестников землетрясений можно сформулировать следующие требования к спутниковым съемочным системам и методам обработки данных:

- ежесуточныеочные наблюдения с разрешением до нескольких километров,
- использование 2-3 спектральных зон в тепловом и среднем ИК-диапазонах для атмосферной коррекции,
- оценка температуры поверхности моря (после атмосферной коррекции) с точностью ~0.5 К и температуры поверхности суши с точностью ~1 К, для чего радиометрический шум съемочной системы не должен превышать $\text{НЕДТ} = 0.1\text{-}0.2$ К,
- использование пространственно-временных аддитивных алгоритмов для учета сезонных и метеорологических вариаций температуры.

Существующие геостационарные (GOES, Meteosat) и солнечно-синхронные (AVHRR/NOAA, MODIS/Terra-Aqua) спутниковые системы и рассмотренные в данной работе методы обработки данных, в целом, удовлетворяют этим требованиям.

Литература

1. Pulinets S.A. Space technologies for short-term earthquake warning // Advances in Space Research, 2006. V.37. P.643–652.
2. Дуда Л.Н., Новикова Н.Н., Пахомов Л.А., Горлач И.А., Куревлева Т.Г. Прогнозирование и космический мониторинг предвестников землетрясений: проблемы, надежды и реалии // V научно-практическая конференция “Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций”, 15-16 ноября 2005 г. М. 2006. С.114-120.
3. Cervone G., Kafatos M., Napoletani D., Singh R.P. An early warning system for coastal earthquakes // Advances in Space Research, 2006. V.37. P.636–642.
4. Gornyi V.I., Sal'man A.G., Tronin A.A., Shilin B.V. The Earth outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity // Proc. of the Academy of Sciences of the USSR, 1988. V.301. №1. P.67-69.
5. Tronin A. A. Satellite thermal survey—a new tool for the study of seismoactive regions // International Journal of Remote Sensing, 1996. V.41. №8. P.1439– 1455.
6. Qiang Zu-ji, Xu Xiu-Deng, Dian Chang-Gong. Thermal infrared anomaly-precursor of impending earthquakes // Pure and Applied Geophysics, 1997. V.149. P.159– 171.
7. Ouzounov D., Freund, F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // Advances in Space Research, 2004. V.33. P.268– 273.
8. Chen H., Parnell J., Gong Z. Large-scale seismic thermal anomaly linked to hot fluid expulsion from a deep aquifer // Journal of Geochemical Exploration, 2006. V.89. P.53–56.
9. Tramutoli V., Cuomo V., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C. Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaeli (Izmit) earthquake, August 17, 1999 // Remote Sensing of Environment, 2005. V.96. P.409 – 426.
10. Cervone G., Kafatos M., Napoletani D., Singh R.P. Wavelet maxima curves associated with two recent Greek earthquakes // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004. V.4. P.359–374.
11. Dech S.W., Tungalagsaikhan P., Preusser C., Meisner R. Operational value-adding to AVHRR data over Europe: models, results, and prospects // Aerospace science and technology, 1998. V.5. P.335-346.
12. McClain E. P., Pichel W. G., Walton C. C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures // J. Geophys. Res., 1985. V.90. №C6. P.11587-11601.
13. Becker F., Li Z.-L Toward a local split window method over land surface // Int. J. Remote Sens., 1990. V.11. №3. P.369-393.
14. Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс и проблемы прогноза сильных коровых землетрясений // Седьмая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", М., ИКИ РАН, 16-20 ноября 2009 г. Сборник тезисов конференции.

Spatial and temporal analysis of thermal anomalies as earthquake precursors

B.S. Zhukov¹, W. Halle², G. Schlotzhauer², D. Oertel²

¹*Space Research Institute, RAS,
117997 Moscow, Profsoyuznaya 84/32
E-mail: bzhukov@nserv.iki.rssi.ru;*
²*DLR Institut für Robotik und Mechatronik – Optische Informationssysteme,
12489 Berlin, Rutherfordstrasse 2,
E-mail: winfried.halle@dlr.de*

The potential of thermal anomalies as earthquake precursors was analyzed using an 8-year (from 1997 till 2004) temporal series of AVHRR/NOAA IR daily temperature measurements over the Ionian Sea and Greece. Thermal anomalies were detected using thresholding of the «signal-to-noise ratio» (SNR), where background temperature variations were considered as noise. The case study of the 14 August 2003 Greek earthquake showed that sea surface temperature anomalies with SNR>3 in multiple areas along the boundary between the Eurasian and African plates can be reasonably related to the impending earthquake. Reliability of using land surface temperature anomalies for earthquake forecasting was not confirmed in this case.

Keywords: earthquake precursors, thermal anomalies, satellite thermal IR observations, 14 August 2003 Greek earthquake.